

## **Eksperymentalna analiza energetyczna i ekologiczna współspalania biomasy z węglem w kotle C.O. z paleniskiem retortowym**

Izabela DYRLAGA\*

Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska  
e-mail: dyrlagaizabela@gmail.com

**Słowa kluczowe:** biomasa, węgiel, współspalanie, palenisko retortowe

**Streszczenie:** Odnawialne źródła energii zyskują coraz większą popularność, a węgiel kamienny w kotłach C.O. stopniowo zostaje zastąpiony przez biomasę. Niniejsza praca prezentuje ekologiczną i energetyczną analizę współspalania biomasy w kotle C.O. z paleniskiem retortowym. Analizie poddano biomasę pochodzenia drzewnego. Analizowany kocioł pierwotnie zaprojektowany został do spalania węgla kamiennego w postaci tzw. ekogroszku. Oceniając efekty współspalania biomasy pod uwagę wzięto sprawność kotła oraz emisję substancji szkodliwych do otoczenia. W analizie ekologicznej skupiono się na emisji dwutlenku węgla, tlenku węgla, tlenku azotu oraz dwutlenku siarki. Analiza energetyczna oparta została na zbadaniu zmiany sprawności energetycznej kotła w zależności od użytej mieszanki paliwowej. Dla uzyskania pełnego zakresu wyników analizie poddano mieszanki paliwowe o różnej zawartości biomasy.

---

\* Rozdział przygotowano podczas pracy nad projektem dyplomowym magisterskim wykonywanym przez autora w Instytucie Techniki Ciepłej na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej, pod opieką Dra inż. Tomasza Burego.

# 1 Wprowadzenie

## 1.1 Przegląd współczesnych technologii kotłów centralnego ogrzewania

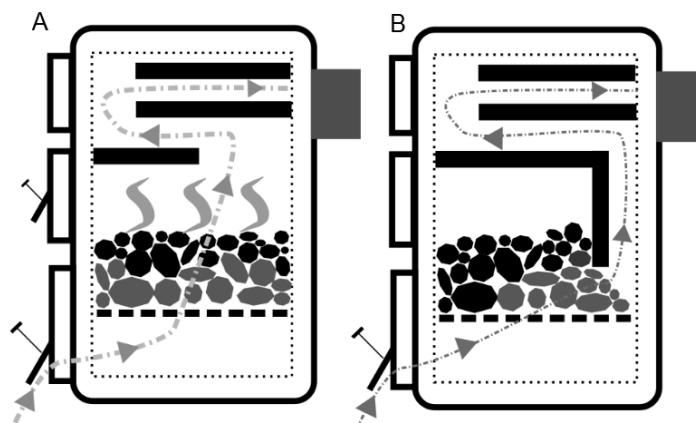
Ponad 95% wszystkich instalacji centralnego ogrzewania budynków w Polsce stanowi centralne ogrzewanie wodne. Nośnikiem ciepła jest gorąca woda, która jest podgrzewana w kotle w wyniku spalania paliw organicznych (węgiel, gaz ziemny, olej opałowy). Taki sposób ogrzewania ma kilka zalet, do których zaliczyć można: prostą obsługę, dostępność elementów instalacji, możliwość samodzielnego jej wykonania, duże bezpieczeństwo eksploatacji, łatwość centralnej regulacji temperatury wody wypływającej ze źródła ciepła oraz regulacji miejscowej, np. zaworami termostacyjnymi, a także długą żywotność instalacji. Jako wadę wskazać należy niebezpieczeństwo zamarznięcia wody i uszkodzenia elementów instalacji.

Obecnie istnieje wiele technologii kotłów centralnego ogrzewania. Podstawowym kryterium podziału źródeł ciepła są: moc, rodzaj materiału z jakiego wykonano powierzchnie grzewcze kotła, rodzaj spalanego paliwa oraz ciśnienie lub temperatura wytwarzanego czynnika. W instalacjach centralnego ogrzewania jako źródła ciepła stosuje się kotły wykonane z żeliwa lub ze stali. Kotły te przystosowane są do spalania paliw stałych, ciekłych lub gazowych. Krótka charakterystyka tych źródeł ciepła została przedstawiona w dalszej części opracowania.

### 1.1.1 Kotły żeliwne

Kotły żeliwne wprowadzone zostały do użytku pod koniec XIX wieku. Jest to najstarszy typ kotłów, w dalszym ciągu bardzo chętnie wykorzystywany ze względu na swoją długą żywotność. Kotły te najczęściej opalane są paliwem stałym. Mogą być wyposażone w paleniska rusztowe, bezrusztowe lub mechaniczne. Kotły żeliwne na ogół posiadają budowę członową – mogą składać się z kilku członów wypełnionych wodą i parą. Człony, od strony zewnętrznej, omywane są gorącymi spalinami. W celu intensyfikacji procesu wymiany ciepła człony najczęściej posiadają ożebrowanie.

Kotły żeliwne mogą różnić się od siebie sposobem spalania paliwa. Na schemacie zamieszczonym na rys. 1 przedstawiono kotły żeliwne o spalaniu górnym (A) oraz o spalaniu dolnym (B).

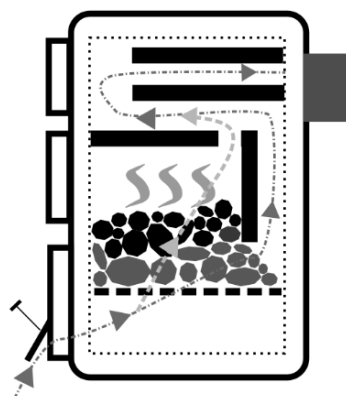


Rysunek 1. Schemat kotłów żeliwnych o spalaniu górnym (A) oraz dolnym (B) [14]

Podczas spalania w kotle żeliwnym o spalaniu górnym paliwo zamienia się w żar, a spaliny przepływają przez całą warstwę paliwa znajdującego się w kotle [15]. Jest to najczęściej stosowany oraz najtańszy typ kotłów żeliwnych. Komora spalania kotłów z górnym spalaniem, często nazywanych kotłami komorowymi, na ogół połączona jest z komorą zsypową, co powoduje, że w krótkim czasie możliwe jest uzyskanie maksymalnej mocy. Mają one jeden lub dwa ciągi spalin oraz stały ruszt paleniska. Sprawność tych kotłów dochodzi do 75% [11]. Zaletami kotłów ze spalaniem górnym są: możliwość szybkiego rozpalenia, stosunkowo duża niezawodność pracy oraz małe niebezpieczeństwo korozji. Do wad można zaliczyć małą możliwość regulacji mocy, małą sprawność oraz konieczność cyklicznego rozpalania, ponieważ nie ma możliwości dosypywania paliwa w trakcie cyklu palenia.

W kotłach ze spalaniem dolnym, inaczej nazywanych kotłami zasypowymi, proces spalania przebiega na tylnej ścianie komory zasypowej lub w komorze spalania znajdującej się z tyłu komory zasypu. Taki typ kotłów z reguły posiada dwa lub trzy ciągi spalin, przez co charakteryzuje się też większą sprawnością, sięgającą nawet 90%. Komora spalania oraz komora zasypowa w takich kotłach są rozdzielone, co umożliwia stopniowe spalanie paliwa. Kiedy paliwo wypali się na ruszcie jest ono zsypywane z zasobnika. Szczeliny w ruszcie w kotłach zasypowych są zazwyczaj węższe niż w kotłach komorowych. Niewątpliwymi zaletami kotłów z dolnym spalaniem są: mniejsza emisja zanieczyszczeń do atmosfery oraz możliwość zapewnienia stałej wydajności cieplnej. Największą wadą takich kotłów jest fakt, że komora spalania jest zadymiona i zasmolona.

Kotły uniwersalne (ze spalaniem górno-dolnym) - wbrew temu co sugeruje ich nazwa nie łączą zalet górnego i dolnego spalania. Schemat takiego rozwiązania przedstawiony został na rys. 2.



Rysunek 2. Kocioł żeliwny ze spalaniem górno-dolnym [14]

Jest to próba kombinacji dwóch opisanych wcześniej konstrukcji, która jednak nie funkcjonuje prawidłowo. Daje jednak możliwość spalania różnorodnych paliw stałych.

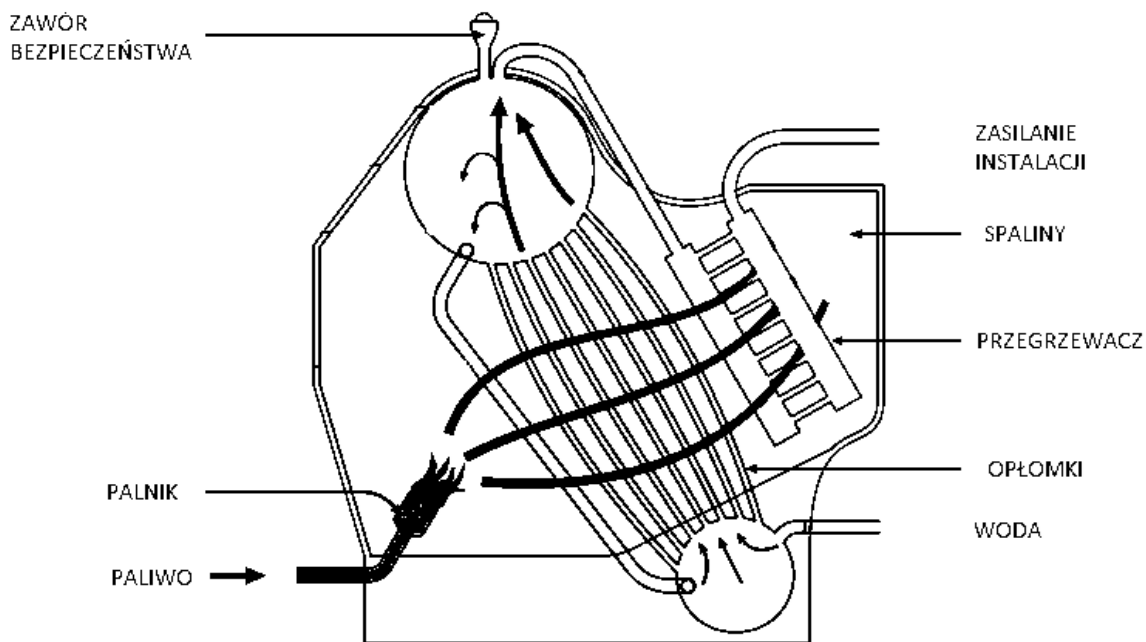
Jedną z najważniejszych zalet kotłów żeliwnych jest ich bardzo długa żywotność, która sięga nawet 40 lat.

### 1.1.2 Kotły stalowe

Pierwsze kotły stalowe wykorzystywane były do produkcji pary wodnej do celów technologicznych. W porównaniu do kotłów żeliwnych charakteryzują się mniejszą trwałością (do 15 lat). Jednym z podstawowych kryteriów podziału kotłów stalowych jest sposób, w jaki spaliny opływają powierzchnie grzewalne. Można wyróżnić kotły:

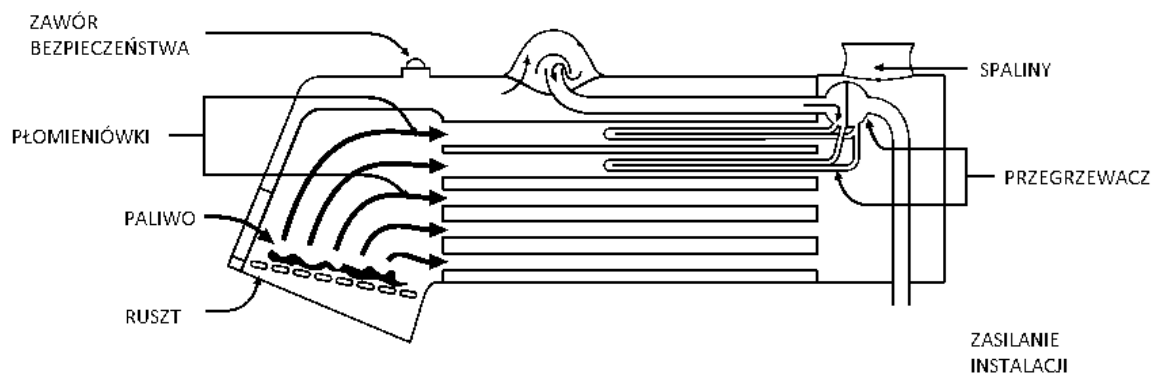
- wodnorurkowe (opłomkowe),
- płomieniówkowe,
- płomienicowo-płomieniówkowe.

W kotle wodnorurkowym (rys. 3) spaliny opływają rury (opłomki), w których znajduje się woda. Woda odparowuje w rurkach, natomiast para oddzielana jest od wody w walczaku. W tego typu kotłach wykorzystywany jest grawitacyjny (naturalny) lub pompowy obieg wody. W dolnej części kotła znajdują się rurki, które oplatają komorę paleniskową. Tam ciepło przekazywane jest głównie przez promieniowanie. Kotły opłomkowe wymagają ciągłego przepływu wody i uzupełniania jej ubytków. Przy odpowiednim wyposażeniu, kotły opłomkowe mogą być opalane wszystkimi możliwymi rodzajami paliw.



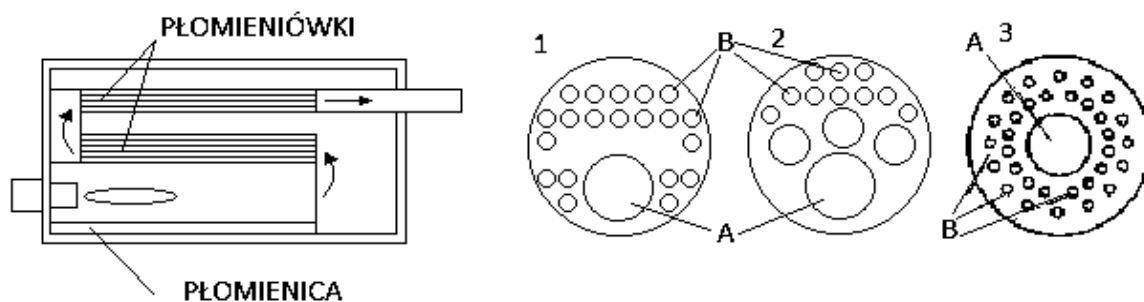
Rysunek 3. Schemat kotła wodnorurkowego

Kotły płomieniówkowe to kotły parowe, które charakteryzują się tym, że spaliny przepływają wewnątrz rurek połączonych w wiązki (tzw. płomieniówki), natomiast woda omywa je z zewnątrz. Można wyróżnić kotły płomieniówkowe poziome oraz pionowe. Kotły te wykonywane są w kształcie prostopadłościanu lub walca, z wbudowanymi płomienicami. Kotły płomieniówkowe ze względu na niską sprawność są rzadko stosowane. Schemat tego typu kotła przedstawiono na rys. 4.



Rysunek 4. Schemat kotła płomieniówkowego

Kotły płomienicowo-płomieniówkowe są obecnie często wykorzystywane. Schemat takiego rozwiązania przedstawiony został na rys. 5. Kocioł składa się z płaszcza i płomienicy przedłużonej płomieniówkami. Spalanie paliwa odbywa się w płomienicy, kolejno gorące spaliny przechodzą przez płomieniówki i ogrzewają wodę. Dzięki zastosowaniu płomieniówek zwiększona została powierzchnia wymiany ciepła.



Rysunek 5. Schemat kotła płomienicowo-płomieniówkowego wraz z przykładami rozmieszczenia płomienic (A) oraz płomieniówek (B) 1-trójciągowy, płomienica otwarta z tyłu; 2- trójciągowy, płomienica otwarta, różne grubości płomieniówek; 3 – płomienica zamknięta z tyłu

## 1.2 Charakterystyka palenisk kotłowych

Palenisko zajmuje centralną część kotła. Jego zadaniem jest możliwie zupełne i całkowite spalanie paliwa doprowadzonego do kotła z udziałem jednocześnie doprowadzanego powietrza. Konstrukcja paleniska może zależeć od: rodzaju paliwa, sposobu spalania, wydajności kotła oraz konstrukcji kotła.

Ważnym parametrem charakteryzującym palenisko jest obciążenie cieplne komory paleniskowej. Określa ono ilość ciepła wywiązanej w czasie 1 sekundy, przypadającą na 1 m<sup>3</sup> objętości komory paleniskowej:

$$q_v = \frac{\dot{P}W_d}{V_K} \quad (1.2.1)$$

gdzie:

$q_v$  - obciążenie cieplne komory paleniskowej,  $\frac{W}{m^3}$

$\dot{P}$  – strumień paliwa,  $\frac{kg}{s}$

$W_d$  - wartość opałowa paliwa,  $\frac{J}{kg}$

$V_K$  – objętość komory paleniskowej,  $m^3$

Innymi parametrami charakteryzującymi paleniska są: masowe obciążenie powierzchni czynnej rusztu ( $b_R$ ) oraz obciążenie cieplne powierzchni rusztu ( $q_R$ ). Wskaźniki te informują ile paliwa można spalić na  $1 m^2$  powierzchni rusztu. Dopuszczalne obciążenie cieplne rusztu wynosi  $q_R = 550 \div 1200 \frac{kW}{m^2}$ , natomiast dopuszczalne obciążenie masowe  $b_R = 80 \div 500 \frac{kg}{m^2 \cdot h}$  [10].

$$b_R = \frac{P'}{R} \quad (1.2.2)$$

$$q_R = \frac{\dot{P}W_d}{R} \quad (1.2.3)$$

gdzie:

$P'$  – godzinowe zużycie paliwa,  $\frac{kg}{h}$

$R$  – powierzchnia rusztu,  $m^2$

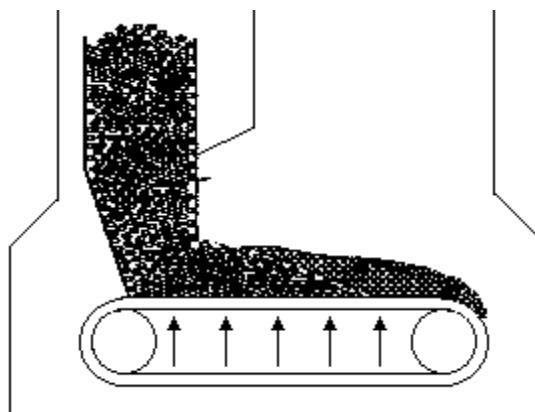
Najogólniej paleniska kotłowe można podzielić na rusztowe (warstwowe), komorowe (palnikowe) oraz fluidalne. Istnieją również inne podziały palenisk, np. ze względu na rodzaj paliwa lub sposób obsługi.

### 1.2.1 Paleniska rusztowe

Palenisko rusztowe przeznaczone jest do spalania paliw stałych. Składa się z rusztu i komory spalania. Ruszt zbudowany jest z rusztowin leżących swobodnie na belkach rusztowych. Warstwa paliwa spala się w takim palenisku na ruszcie, natomiast powietrze potrzebne do spalania doprowadzone jest od dołu. Przepływ powietrza koniecznego do spalania oraz przesypywanie się popiołu możliwe jest dzięki szczelinom znajdującym się między rusztowinami. Obciążenie cieplne dla palenisk rusztowych zawiera się w granicach  $290 \div 460 \frac{kW}{m^3}$  [9]. Im mniejsze kotły, tym większe ich obciążenie  $q_v$ . Istnieją również paleniska z rusztem pochyłym ( $\alpha = 40^\circ - 45^\circ$ ), które umożliwiają samoczynne osuwanie się paliwa w stronę komory żużlowej.

Znacznie łatwiejsze w obsłudze są kotły z rusztem ruchomym, gdzie podawanie paliwa i oczyszczanie z żużlu jest całkowicie zmechanizowane – patrz rys. 6. Ruchomy ruszt tworzy

stalowa taśma składająca się z połączonych ze sobą żeliwnych rusztowin, rozpięta między dwoma walcami. Jeden z tych walców jest napędzany. Strumień paliwa, podawany z zasobnika, regulowany jest przez grubość warstwy paliwa. Paliwo przesuwaną się na taśmie ulega spalaniu, a następnie, na końcu taśmy, trafia do popielnika.



Rysunek 6. Schemat paleniska z rusztem taśmowym

### 1.2.2 Paleniska komorowe

Paleniska komorowe, zwane inaczej palnikowymi, przeznaczone są do spalania pyłów, gazów i olejów. Najczęściej w kotłach o małej wydajności wykorzystywane są paleniska pyłowe. Paleniska pyłowe charakteryzują się wysoką wydajnością, małym stosunkiem nadmiaru powietrza oraz małą stratą kominową. Wadą tych palenisk jest konieczność wykorzystania urządzeń do przygotowania pyłu i związane z tym znaczne zużycie energii elektrycznej. Taki rodzaj paleniska nie posiada rusztu, a pył węglowy wprowadzany jest do komory spalania przez palniki pyłowe wraz z powietrzem. Obciążenie cieplne dla kotłów z paleniskiem komorowym zawiera się w granicach  $145 \div 290 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3}$ .

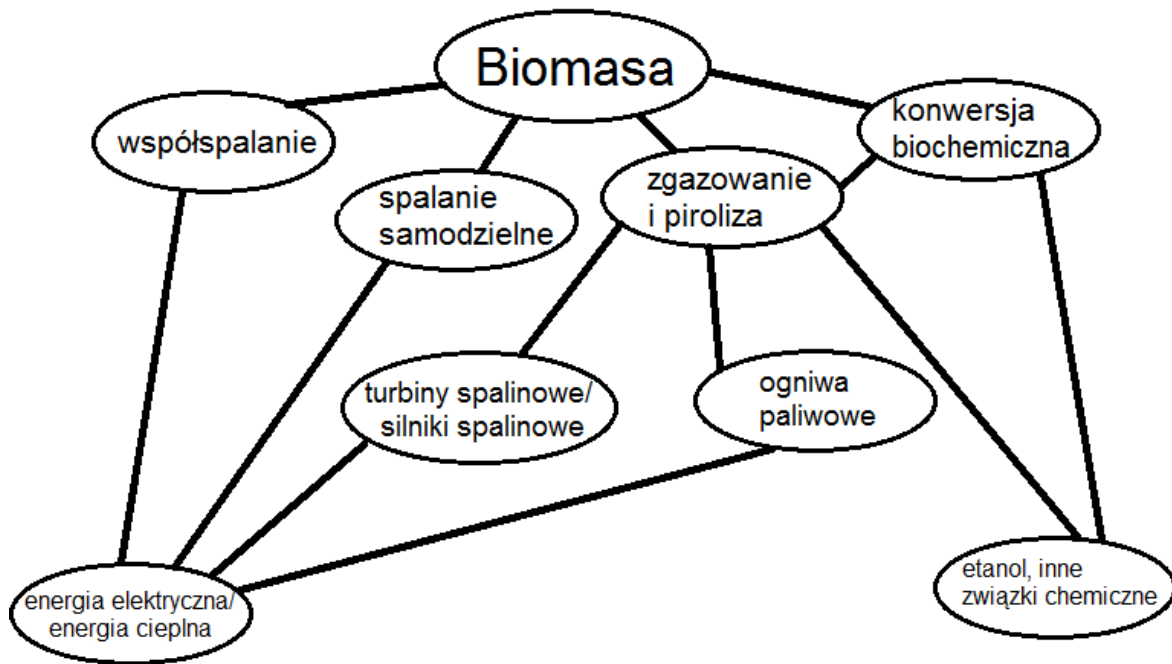
Paleniska na olej lub na gaz są łatwe w obsłudze, a także mają wysoką sprawność. Ponieważ paliwa te nie są tak powszechne w Polsce jak węgiel, ten typ palenisk jest zdecydowanie rzadziej wykorzystywany w kotłach centralnego ogrzewania.

### 1.3 Biomasa jako paliwo w kotłach grzewczych

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Gospodarki i pracy z dnia 9 grudnia 2004 roku biomasa to stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz leśnej, a także przemysłu przetwarzającego ich produkty, a także części pozostałych odpadów, które ulegają biodegradacji [1]. Biomasa jest odnawialnym źródłem energii, które z powodzeniem może zastąpić użytkowanie paliw kopalnych, takich jak węgiel. W 2014 roku w Polsce ponad 75% energii pozyskanej z odnawialnych źródeł energii pochodziło z biopaliw stałych [5].

Źródłami biomasy mogą być odpady leśne, odpady rolnicze, uprawy energetyczne oraz wiele innych. Obecnie najczęściej wykorzystywana jest słoma. Szacuje się, że w Polsce rocznie produkowane jest ok. 25 mln ton słomy, z czego prawie 12 mln ton to nadwyżka, którą można wykorzystać w celach energetycznych. Całkowity potencjał techniczny biomasy w Polsce szacuje się na ok. 755 PJ/rok [2].

Na rys. 7 przedstawiono główne sposoby użytkowania biomasy. Naturalnym kierunkiem rozwoju energetycznego wykorzystania biomasy w Polsce jest produkcja ciepła. Biomasa, w celach grzewczych, może być spalana w nowoczesnych kotłach małej mocy. Ze względu na małą zawartość siarki, azotu oraz części niepalnych biomasa charakteryzuje się małą emisją substancji szkodliwych do otoczenia.



Rysunek 7. Główne technologie konwersji biomasy

Z uwagi na dużą różnorodność biomasy oraz konieczność dostosowania technologii i mocy urządzeń biomasa wykorzystywana jest w różnej postaci. Drewno wykorzystuje się w postaci rozdrobnionej (zrębki, ścinki, trociny itp.), natomiast słomę i inne biopaliwa z rodziny trawiastej w postaci sprasowanych balotów, granulatów lub brykietów, a także w postaci rozdrobnionej (sieczenka).

Podczas spalania biopaliw zaobserwować można duże zróżnicowanie w ich zachowaniu, które wynika ze znaczącej zmienności składu biopaliw. W tabeli 1 przedstawiono przykładowy skład i właściwości biomasy w odniesieniu do węgla kamiennego. Analiza pierwiastkowa zaprezentowana została w przeliczeniu na stan suchy paliwa.



Tabela 1 Analiza techniczna i elementarna wybranych rodzajów biomasy i węgla kamiennego [5]

→ Rodzaj biomasy ↓ Składnik	Słoma żółta	Słoma szara	Drewno bez kory	Zrębki	Brykiet	Wierzba	Węgiel kamienny
Wilgoć, %	10-20	10-25	5-60	20-50	7-12	50-60	5-10
Części lotne, %	70-80	70-80	>70	76-86	>70	>70	25-40
Popiół, %	5	3	0,4-0,5	0,8-1,4	0,4-1,5	1,1-4,0	8,5-11
C, %	45-48	43-48	48-52	47-52	48-52	47-51	76-87
H, %	5-6	5-6	6,2-6,4	6,1-6,3	6-6,4	5,8-6,7	3,5-5
O, %	36-48	36-48	38-42	38-45	40	40-46	2,8-11,3
Cl, %	0,97	0,14	0,01- 0,03	0,02	0,02- 0,04	0,02-0,05	<0,1
N, %	0,3-0,6	0,3-0,6	0,1-0,5	<0,3	0,3-0,9	0,2-0,8	0,8-1,5
S, %	0,05- 0,02	0,05- 0,2	<0,05	<0,05	0,04- 0,08	0,02-0,1	0,5-3,1
K, %	1,3	0,7	0,02- 0,05	0,02	-	0,2-0,5	0,003
Ca, %	0,6	0,1	0,1-1,5	0,04	-	0,2-0,7	4-12
Ciepło spalania, MJ/kg	17,4	17,4	18,5-20	19,2- 19,4	16,2-19	18,4-19,2	26-28,3

Szczególnie zauważalna jest różnica w wilgoci i ilości popiołu, a także w ilości azotu, siarki i chloru. W odniesieniu do węgla kamiennego największe różnice występują w zawartości węgla pierwiastkowego. Biomasa posiada również mniejszą wartość ciepła spalania oraz większą ilość części lotnych.

## 2 Cel i zakres pracy

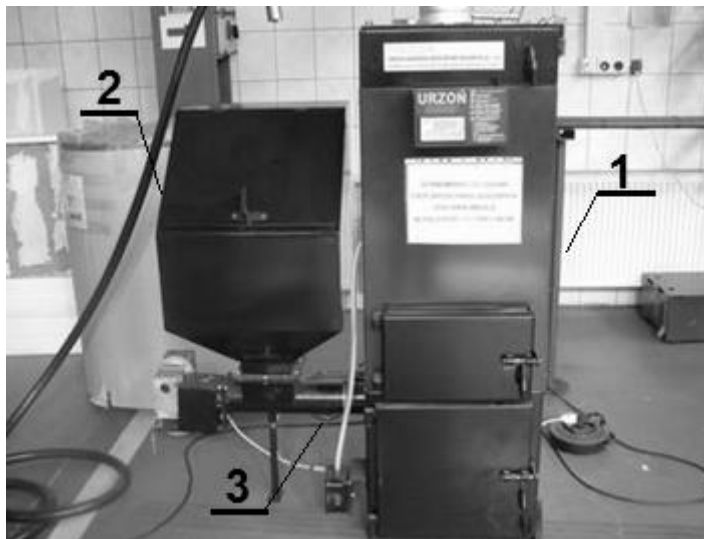
Celem pracy była eksperymentalna, energetyczna i ekologiczna analiza pracy kotła C.O. firmy CRE-URZON z paleniskiem retortowym. Analizie poddano proces współspalania biomasy drzewnej z węglem kamiennym.

Analiza pracy wspomnianego kotła C.O. zakładała zmianę stosunku biomasy do węgla kamiennego w podawanym paliwie, a także określenie wpływu zmiany mieszanki paliwowej na parametry pracy kotła (sprawność) oraz środowisko (emisja substancji do otoczenia). Analizie poddano pięć mieszanek paliwowych o różnej zawartości biomasy. Na potrzeby analizy dokonano pomiarów składu i temperatury spalin, temperatury wody na wlocie i wylocie z kotła oraz temperatury powierzchni kotła w kilku strefach.

Wszystkie niezbędne obliczenia wykonano przy użyciu programu Engineering Equation Solver (EES).

### 3. Stanowisko pomiarowe

Analiza przeprowadzona została na stanowisku do badań cieplnych i ekologicznych spalania węgla w palenisku retortowym. Stanowisko mieści się w Laboratorium Ciepłych Procesów Wysokotemperaturowych Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej. Widok stanowiska przedstawiony został na rys. 8. Stanowisko składa się z kotła (1) z paleniskiem retortowym, zasobnika paliwa (2), układu automatycznego podawania paliwa (3) oraz wentylatora tłoczącego powietrze do komory spalania. Na przedniej ścianie kotła zainstalowany został panel sterujący.



Rysunek 8. Stanowisko do badań cieplnych i ekologicznych spalania węgla w palenisku retortowym: 1 – kocioł; 2 – zasobnik paliwa; 3 – podajnik ślimakowy

#### 3.1 Charakterystyka kotła

##### 3.1.1 Palenisko retortowe

Proces spalania w kotle przebiega na zasadzie spalania górnego. Dzięki specjalnemu palenisku bezresztowemu, spala się dokładnie taka porcja węgla, jaka jest potrzebna do otrzymania pożądanej temperatury. Paleniska retortowe umożliwiają pracę urządzenia w trybie automatycznym.

### 3.1.2 Układ podawania paliwa

Paliwo stałe magazynowane jest w zasobniku paliwa. Paliwo doprowadzane jest do retorty za pomocą podajnika ślimakowego. Podajnik zbudowany jest z kilku podzespołów. Motoreduktor napędza ślimak podajnika, na który zsypuje się paliwo z zasobnika. Paliwo następnie jest transportowane do palnika retortowego i wypychane w stronę górnej części palnika. Tam ulega spalaniu. Wpychane przez podajnik retortowy paliwo spycha jednocześnie z palnika popiół pozostający po spaleniu wcześniej dostarczonej porcji.

Proces podawania paliwa odbywa się cyklicznie. Czas podawania paliwa oraz czas przerwy pomiędzy podawaniem paliwa ustawiany jest przez użytkownika kotła. W trakcie prowadzonych badań, w trybie rozpalania podajnik pracował 13 s po czym następowały 22 s przerwy. Czas pracy i postoju może być dowolnie modyfikowany przez użytkownika. Powietrze potrzebne do spalania dostarczane jest przez wentylator do układu dysz w retorcie paleniska.

### 3.2 Instalacja wodna

Prawidłowy przepływ wody w kotle zapewnia pompa UPS 25-80 firmy Grundfos. Pompa może pracować z trzema prędkościami obrotowymi. Podczas pomiarów pompa pracowała na biegu pierwszym. Użytkownik posiada możliwość regulacji temperatury wody na wypływie z kotła.

### 3.3 Układ pomiarowy

Do analizy składu spalin użyto mobilnego układu. Układ składa się z analizatora spalin firmy ABB, chłodnicy spalin oraz węża podgrzewanego do poboru próbki. Wszystkie te elementy są zainstalowane w mobilnej szafie automatyki. Analizatory pozwalają na pomiar w spalinach zawartości CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO oraz CO.

W czasie analizy zmierzono również temperaturę spalin oraz temperaturę wody na wylocie z kotła (gorącej) oraz wody powrotnej (zimnej). Pomiaru dokonano dzięki zamontowanym dodatkowo termoelementom typu K. W celu określenia strat ciepła do otoczenia dokonano pomiaru temperatury powierzchni kotła przy użyciu termopary dotykowej. Ponadto wykonano pomiar parametrów otoczenia w laboratorium (temperatura oraz wilgotność).

## 4 Charakterystyka badanych paliw

### 4.1 Węgiel

Węgiel kamienny był jednym ze składników analizowanych mieszanek. Wartość opałowa węgla wynosi  $W_d = 24\,450 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ . Skład węgla przedstawiony w tabeli 2 został podany zgodnie z danymi producenta.

### 4.2 Biomasa

Biomasa użyta podczas wykonywania badań jest paliwem pochodzenia drzewnego i ma formę peletów o średnicy 5 mm i długości maksymalnej do 25 mm. Jej wartość opałowa to  $W_d = 18\,800 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ . Skład użytej biomasy przyjęto na podstawie danych od producenta. Skład spalanej biomasy zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 2 Skład węgla kamiennego

		<b>Zawartość pierwiastka</b>
Węgiel	c	0,715
Wodór	h	0,042
Tlen	o	0,048
Azot	n	0,015
Siarka	s	0,01
Wilgoć	w	0,05
Popiół	p	0,12

Tabela 3 Skład biomasy

		<b>Zawartość pierwiastka</b>
Węgiel	c	0,475
Wodór	h	0,06
Tlen	o	0,4129
Azot	n	0,0012
Siarka	s	0,0002
Wilgoć	w	0,045
Popiół	p	0,0057

### 4.3 Mieszanki paliwowe

Podczas przeprowadzonych badań użyto pięciu mieszanek paliwowych o różnym stosunku masowym węgla do biomasy. Pozwoliło to na zaobserwowanie możliwie szerokiego spektrum zmiany parametrów pracy kotła oraz emisji substancji do otoczenia. Skład mieszanek przedstawia się następująco:

- Węgiel kamienny – 100% ; biomasa – 0%
- Węgiel kamienny – 80% ; biomasa – 20%
- Węgiel kamienny – 50% ; biomasa – 50%
- Węgiel kamienny – 20% ; biomasa – 80%
- Węgiel kamienny – 0% ; biomasa – 100%

## 5 Badania eksperymentalne

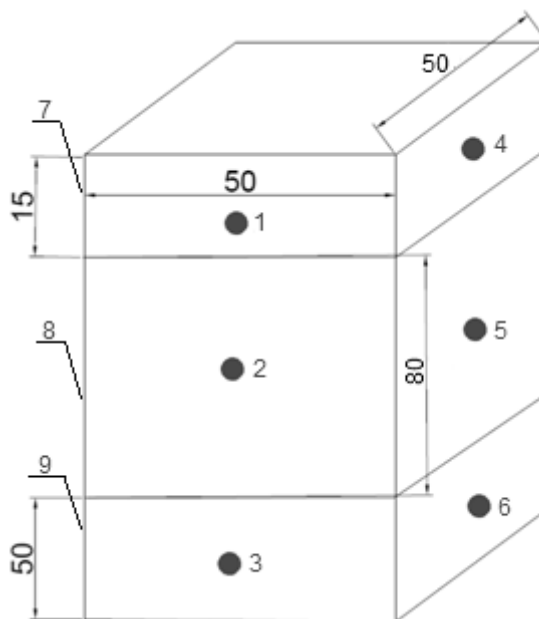
### 5.1 Procedura pomiarowa

Przed rozpoczęciem każdej serii pomiarowej następowało oczyszczenie układu podawania paliwa z pozostałości poprzedniej mieszanki paliwowej. Nową mieszankę zapalano za pomocą palnika gazowego. Pomiary rozpoczynano, gdy temperatura na panelu sterującym kotła (temperatura wody wylotowej z kotła) wynosiła około 40°C. Odczyty wartości z analizatora spalin oraz z termopar dokonywano co 1 minutę. Pomiarów dokonywano w dwóch okresach

pracy kotła, rozdzielonych trybem podtrzymania. Zadana temperatura wody przy wypływie z kotła wynosiła 50°C.

Po zakończeniu pomiarów składu spalin, przystępowano do pomiarów temperatury powierzchni zewnętrznych kotła. Termoparę dotykową umieszczano w miejscach wskazanych na rys. 10. Ze względu na zainstalowany zasobnik paliwa niemożliwe było zmierzenie temperatury w punkcie nr 8.

Procedurę pomiarową powtarzano dla każdej użytej mieszanki.



Rysunek 9 Miejsca pomiaru temperatury na ścianach kotła

## 5.2 Wyniki pomiarów

Wyniki pomiarów dla poszczególnych mieszanek paliwowych przedstawiono w tabelach 4 – 8.

### 5.2.1 Skład spalin

Tabela 4 Wyniki pomiarów dla spalania 100% węgla kamiennego

	<b>t<sub>sp</sub></b> °C	<b>t<sub>w1</sub></b> °C	<b>t<sub>w2</sub></b> °C	<b>CO</b> %	<b>NO</b> ppm	<b>CO<sub>2</sub></b> %	<b>O<sub>2</sub></b> %	<b>SO<sub>2</sub></b> %	<b>Uwagi</b>
1	175,3	27,3	43,7	1,93	243	14,95	2,00	0,011	
2	178,4	27,3	45,0	1,93	212	14,69	2,38	0,012	
3	179,4	27,4	46,4	1,44	216	14,62	2,86	0,011	
4	183,0	27,5	47,5	0,90	237	14,54	3,31	0,005	
5	181,6	27,6	48,3	0,75	245	14,65	3,13	0,006	
6	184,8	27,8	48,9	0,65	232	13,72	4,18	0,006	
7	189,9	28,0	49,4	0,58	215	13,19	4,80	0,004	praca
8	190,1	28,4	49,6	0,63	221	12,86	5,39	0,004	
9	190,3	29,0	49,9	0,25	205	12,55	6,12	0,002	
10	189,4	29,4	49,6	0,19	212	12,86	5,86	0,002	
11	190,0	30,1	49,5	0,31	215	12,51	6,00	0,002	
12	191,0	30,8	49,4	0,15	211	11,72	6,96	0,003	
13	180,1	33,2	50,2	0,06	199	10,40	8,63	0,002	
14	157,0	34,1	50,2	0,09	174	8,93	10,52	0,002	
15	125,9	34,8	50,0	0,20	157	9,70	9,29	0,002	
16	125,6	35,5	49,4	0,09	87	6,04	14,74	0,002	podtrzymanie
17	107,9	36,4	48,3	0,16	107	6,73	13,31	0,002	
18	103,2	36,9	46,4	0,21	100	6,53	13,49	0,002	
19	99,0	37,4	43,9	0,19	103	6,54	13,59	0,002	
20	103,2	37,9	42,4	0,18	100	6,21	13,88	0,002	
21	135,7	38,3	42,5	0,10	112	5,58	14,91	0,002	
22	144,6	38,6	43,4	0,00	137	7,03	13,08	0,003	
23	152,1	38,9	44,4	0,00	138	6,78	13,46	0,002	
24	157,5	39,1	45,6	0,00	142	6,60	13,55	0,002	
25	160,4	39,2	46,7	0,00	164	7,11	12,98	0,002	praca
26	166,2	39,3	47,7	0,00	165	7,30	12,71	0,002	
27	172,3	39,4	48,6	0,00	164	8,22	11,69	0,002	
28	167,6	39,7	49,6	0,00	171	7,22	11,86	0,002	
29	169,0	39,9	50,4	0,00	172	7,97	11,98	0,002	
30	176,1	39,9	52,1	0,00	185	9,12	10,41	0,002	

Tabela 5 Wyniki pomiarów dla 20% biomasy w mieszance paliwowej

	<b>t<sub>sp</sub></b> °C	<b>t<sub>w1</sub></b> °C	<b>t<sub>w2</sub></b> °C	<b>CO</b> %	<b>NO</b> ppm	<b>CO<sub>2</sub></b> %	<b>O<sub>2</sub></b> %	<b>SO<sub>2</sub></b> %	<b>Uwagi</b>
1	170,2	26,5	42,4	1,87	236	14,51	1,94	0,010	
2	173,2	26,5	43,7	1,87	206	14,26	2,31	0,011	
3	174,2	26,6	45,0	1,40	210	14,19	2,78	0,010	
4	177,7	26,7	46,1	0,87	230	14,12	3,21	0,005	
5	176,3	26,8	46,9	0,73	238	14,22	3,04	0,006	
6	179,4	27,0	47,5	0,63	225	13,32	4,06	0,006	
7	184,4	27,2	48,0	0,56	209	12,81	4,66	0,004	praca
8	184,6	27,6	48,2	0,61	215	12,49	5,23	0,004	
9	184,8	28,2	48,4	0,24	199	12,18	5,94	0,002	
10	183,9	28,5	48,2	0,18	206	12,49	5,69	0,002	
11	184,5	29,2	48,1	0,30	209	12,15	5,83	0,002	
12	185,4	29,9	48,0	0,15	205	11,38	6,76	0,003	
13	182,6	30,7	48,3	0,12	212	10,67	7,51	0,003	
14	178,8	31,4	48,4	-	207	10,32	8,32	0,003	
15	174,9	32,2	48,7	0,06	193	10,10	8,38	0,002	
16	152,4	33,1	48,7	-	169	8,67	10,21	0,002	
17	122,2	33,8	48,5	0,19	152	9,42	9,02	0,002	podtrzymanie
18	121,9	34,5	48,0	0,09	84	5,86	14,31	0,002	
19	104,8	35,3	46,9	0,16	104	6,53	12,92	0,002	
20	100,2	35,8	45,0	0,20	97	6,34	13,10	0,002	
21	96,1	36,3	42,6	0,18	100	6,35	13,19	0,002	
22	100,2	36,8	41,2	0,17	97	6,03	13,48	0,002	praca
23	131,7	37,2	41,3	0,10	109	5,42	14,48	0,002	
24	140,4	37,5	42,1	-	133	6,83	12,70	0,002	
25	147,7	37,8	43,1	-	134	6,58	13,07	0,002	
26	152,9	38,0	44,3	-	138	6,41	13,16	0,002	
27	155,7	38,1	45,3	-	159	6,90	12,60	0,002	
28	161,4	38,2	46,3	-	160	7,09	12,34	0,002	
29	167,3	38,3	47,2	-	159	7,98	11,35	0,002	
30	162,7	38,5	48,2	-	166	7,01	11,51	0,002	
31	164,1	38,7	48,9	-	167	7,74	11,63	0,002	
32	171,5	38,7	49,8	-	184	8,25	11,07	0,002	
33	171,0	38,7	50,6	-	180	8,85	10,11	0,002	

Tabela 6 Wyniki pomiarów dla 50% biomasy w mieszance paliwowej

	t <sub>sp</sub> °C	t <sub>w1</sub> °C	t <sub>w2</sub> °C	CO %	NO ppm	CO <sub>2</sub> %	O <sub>2</sub> %	SO <sub>2</sub> %	Uwagi
1	135,9	32,5	44,2	0,03	175	6,61	13,54	0,00	
2	145,5	32,0	42,6	-	174	7,33	12,57	0,00	
3	155,2	31,8	43,0	-	194	7,88	11,89	0,00	
4	156,0	31,7	43,3	-	201	8,56	10,99	0,00	
5	155,8	31,7	43,6	-	184	8,03	11,67	0,00	
6	159,8	31,9	44,1	-	192	8,04	11,80	0,00	
7	165,7	32,1	44,5	-	208	8,02	11,68	0,00	
8	167,0	32,4	44,9	-	225	8,48	11,05	0,00	
9	166,8	32,7	45,2	-	219	8,33	11,28	0,00	
10	169,4	33,0	45,6	-	218	8,39	11,25	0,00	
11	169,0	33,5	46,1	-	219	8,87	10,51	0,00	
12	165,9	33,7	46,4	-	209	8,55	10,93	0,00	praca
13	162,8	33,8	46,8	-	197	7,96	11,60	0,00	
14	169,1	33,9	47,3	-	199	8,12	11,54	0,00	
15	168,7	33,9	47,7	-	206	8,51	11,03	0,00	
16	168,2	33,8	48,0	-	197	8,41	11,18	0,00	
17	169,2	33,7	48,2	-	195	8,34	11,22	0,00	
18	171,4	33,7	48,4	-	219	8,75	10,71	0,00	
19	174,1	33,8	48,6	-	217	9,56	9,86	0,00	
20	178,7	33,9	48,9	-	204	9,39	10,04	0,00	
21	181,9	33,9	49,3	-	214	9,50	9,89	0,00	
22	178,9	34,1	49,7	-	212	9,20	10,03	0,00	
23	174,3	34,2	49,9	-	197	8,75	10,73	0,00	
24	124,2	34,8	50,1	0,00	163	7,38	12,70	0,00	
25	107,3	35,0	48,7	0,11	162	7,88	11,58	0,00	podtrzymanie
26	99,1	35,2	47,5	0,18	150	7,59	12,46	0,00	
27	93,4	35,4	44,3	0,24	140	7,43	12,26	0,00	
28	126,1	35,8	40,9	0,00	121	6,03	13,61	0,00	
29	135,6	36,0	41,5	0,00	167	5,71	14,35	0,00	
30	143,1	36,2	42,1	-	149	5,92	14,27	0,00	
31	149,5	36,3	43,0	-	156	6,29	14,01	0,00	
32	149,9	36,4	43,7	-	158	6,38	13,73	0,00	
33	152,7	36,5	44,3	-	151	6,15	14,01	0,00	praca
34	156,0	36,7	45,1	-	176	6,74	13,27	0,01	
35	157,7	36,8	45,9	-	186	7,22	12,58	0,01	
36	162,2	36,9	46,6	-	174	7,14	12,80	0,01	
37	165,3	37,0	47,4	-	188	7,68	12,05	0,01	
38	170,7	36,9	48,1	-	205	7,81	11,85	0,01	
39	174,1	36,8	48,6	-	211	8,02	11,55	0,01	



40	174,7	36,6	49,2	-	194	8,10	11,50	0,01
41	177,8	36,2	49,7	-	184	8,05	11,59	0,01
42	173,2	35,7	50,0	-	184	8,22	11,50	0,01
43	174,2	35,3	50,0	-	185	8,27	11,43	0,01

Tabela 7 Wyniki pomiarów dla 80% biomasy w mieszance paliwowej

	$t_{sp}$ °C	$t_{w1}$ °C	$t_{w2}$ °C	CO %	NO ppm	CO <sub>2</sub> %	O <sub>2</sub> %	SO <sub>2</sub> %	Uwagi
1	244,9	25,0	46,4	0,00	209	8,16	11,62	0,001	
2	249,6	25,2	47,2	0,06	210	8,32	11,43	0,001	
3	247,7	25,6	48,0	0,00	220	7,38	12,26	0,001	
4	255,7	26,2	48,4	0,07	223	8,24	11,56	0,001	
5	263,4	27,4	49,4	0,14	202	8,32	11,24	0,001	
6	244,7	28,6	50,4	0,06	189	7,46	12,19	0,001	
7	233,8	29,5	51,2	0,00	180	6,44	13,33	0,001	
8	223,3	30,3	51,3	0,00	166	5,66	14,23	0,001	
9	214,7	31,3	50,7	0,00	149	4,85	15,17	0,001	
10	207,7	32,3	49,5	0,00	142	4,48	15,55	0,001	
11	200,8	33,4	47,9	0,00	134	4,23	15,84	0,001	
12	198,1	34,0	47,3	0,00	138	4,35	15,73	0,001	
13	197,4	35,1	47,1	0,00	132	4,26	15,83	0,001	
14	194,6	36,2	47,4	0,00	130	3,92	16,17	0,001	
15	193,9	37,1	47,6	0,00	128	3,94	16,21	0,001	
16	190,1	37,6	48,1	0,00	129	3,99	16,15	0,001	
17	193,2	38,1	48,4	0,00	130	3,97	16,16	0,001	praca
18	190,8	38,4	48,9	0,00	131	4,17	15,93	0,001	
19	190,9	38,7	49,5	0,00	131	4,02	16,13	0,001	
20	192,0	38,9	49,8	0,00	139	4,23	15,92	0,001	
21	189,1	39,1	50,2	0,00	131	3,99	16,18	0,001	
22	186,4	39,4	50,6	0,00	124	3,99	16,17	0,001	
23	194,8	39,5	50,7	0,00	121	3,95	16,22	0,001	
24	198,6	39,4	51,1	0,00	141	4,30	15,86	0,001	
25	195,0	39,2	51,3	0,00	141	4,41	15,77	0,001	
26	189,5	39,0	51,6	0,00	138	4,30	15,85	0,001	
27	188,1	38,7	52,0	0,00	125	4,14	16,10	0,001	
28	183,6	38,5	52,1	0,00	133	4,19	15,98	0,002	
29	180,1	38,4	51,9	0,00	120	3,82	16,47	0,002	
30	183,0	38,3	51,6	0,00	122	3,89	16,35	0,002	
31	182,8	38,5	51,1	0,00	127	3,78	16,46	0,002	
32	182,9	38,7	50,8	0,00	130	3,91	16,33	0,002	
33	179,8	38,5	50,5	0,00	126	3,84	16,37	0,002	

34	176,8	38,9	50,1	0,00	119	3,50	16,73	0,002	
35	180,1	38,9	49,7	0,00	116	3,50	16,74	0,002	
36	146,6	39,2	51,1	0,00	101	3,15	17,10	0,002	
37	118,0	39,3	50,4	0,00	34	1,05	19,40	0,002	
38	110,0	39,4	49,5	0,00	29	0,94	19,54	0,002	
39	103,4	39,6	48,0	0,00	26	0,87	16,61	0,002	
40	98,0	39,7	46,5	0,00	25	0,82	19,65	0,002	podtrzymanie
41	93,2	39,9	45,0	0,00	23	0,76	19,69	0,002	
42	89,4	40,1	44,2	0,00	23	0,74	19,72	0,002	
43	85,7	40,2	44,0	0,00	22	0,71	19,75	0,002	
44	90,1	40,4	43,6	0,00	21	0,67	19,81	0,002	
45	123,1	40,7	44,1	0,00	78	2,08	18,23	0,002	
46	130,8	40,8	44,9	0,00	74	2,46	17,93	0,002	
47	135,9	40,9	45,4	0,00	83	2,67	17,66	0,002	
48	141,5	41,0	45,9	0,00	89	2,84	17,48	0,002	
49	152,3	41,0	46,6	0,00	97	3,18	17,14	0,002	praca
50	168,6	40,8	48,6	0,00	111	3,66	16,62	0,002	
51	167,9	40,6	49,2	0,00	109	3,60	16,65	0,002	
52	169,1	40,4	49,6	0,00	102	3,33	16,91	0,002	
53	166,3	40,1	49,9	0,00	97	3,12	17,16	0,002	

Tabela 8 Wyniki pomiarów dla 100% biomasy w mieszance paliwowej

	<b>t<sub>sp</sub></b> <b>°C</b>	<b>t<sub>w1</sub></b> <b>°C</b>	<b>t<sub>w2</sub></b> <b>°C</b>	<b>CO</b> <b>%</b>	<b>NO</b> <b>ppm</b>	<b>CO<sub>2</sub></b> <b>%</b>	<b>O<sub>2</sub></b> <b>%</b>	<b>SO<sub>2</sub></b> <b>%</b>	<b>Uwagi</b>
1	174,6	23,5	40,6	0,01	407	12,41	7,21	0,00	
2	171,8	23,9	40,7	0,03	414	13,12	6,23	0,00	
3	167,1	24,3	41,0	-	423	12,36	6,86	0,00	
4	164,0	24,8	41,3	-	404	10,91	8,28	0,00	
5	162,7	25,2	41,4	-	408	10,93	8,77	0,00	
6	159,2	25,8	41,5	-	398	10,37	9,03	0,00	
7	156,5	26,4	41,5	-	381	9,90	9,58	0,00	
8	155,4	27,0	41,5	-	384	9,54	10,10	0,00	
9	154,0	27,9	41,2	-	360	9,45	10,20	0,00	
10	154,9	28,6	41,3	-	377	9,58	9,98	0,00	praca
11	154,7	29,1	41,4	-	344	9,45	9,95	0,00	
12	158,0	29,6	41,7	-	341	8,85	10,77	0,00	
13	161,4	30,1	42,2	-	384	9,78	9,82	0,00	
14	158,6	30,4	42,8	-	383	9,49	9,87	0,00	
15	160,7	30,8	43,4	-	360	9,05	10,48	0,00	
16	161,4	31,0	44,0	-	377	9,67	9,76	0,00	
17	160,1	31,2	44,8	-	382	9,46	9,69	0,00	
18	155,2	31,5	45,2	-	359	8,56	10,71	0,00	

19	154,1	31,6	45,6	-	339	8,74	10,59	0,00	
20	152,5	31,8	45,6	-	310	8,15	11,27	0,00	
21	149,6	32,0	45,5	-	324	7,51	11,93	0,00	
22	148,8	32,2	45,4	-	325	7,83	12,00	0,00	
23	148,0	32,4	45,3	-	343	7,43	12,10	0,00	
24	147,2	32,5	45,2	-	343	7,25	12,27	0,00	
25	149,5	32,8	45,1	-	338	7,15	12,53	0,00	
26	148,8	33,0	45,2	-	343	7,47	12,52	0,00	
27	149,2	33,3	45,2	-	334	7,31	12,24	0,00	
28	148,7	33,6	45,2	-	345	7,61	11,99	0,00	
29	148,2	33,9	45,4	-	345	7,36	12,28	0,00	
30	149,6	34,3	45,6	-	351	7,31	12,36	0,00	
31	148,9	34,6	45,9	-	354	7,55	12,02	0,00	
32	148,8	35,0	46,1	-	357	7,59	12,11	0,00	
33	150,7	35,3	46,4	-	334	7,40	12,32	0,00	
34	151,2	35,6	46,8	-	365	7,97	11,69	0,00	
35	151,9	35,9	47,2	-	353	7,52	11,97	0,00	
36	149,4	36,1	47,6	-	358	7,61	11,94	0,00	
37	145,7	36,3	47,9	-	330	6,99	12,62	0,00	
38	108,2	36,5	48,0	-	227	6,64	13,73	0,00	
39	98,0	36,6	47,3	0,02	243	7,91	11,69	0,00	
40	93,8	36,8	46,3	1,00	247	7,98	11,52	0,00	podtrzymanie
41	90,3	36,9	44,1	1,00	243	7,93	11,58	0,00	
42	88,1	37,0	42,6	1,00	239	7,78	11,68	0,00	
43	108,7	37,5	41,1	0,03	158	3,79	16,44	0,00	
44	113,9	37,7	41,6	0,03	184	4,33	15,97	0,00	
45	119,8	37,8	42,3	0,03	211	4,75	15,40	0,00	
46	125,3	38,1	43,0	0,03	261	5,69	14,31	0,00	
47	130,8	38,3	44,0	0,00	297	6,39	13,49	0,00	
48	134,2	38,5	44,8	0,00	320	6,65	13,08	0,00	
49	137,0	38,6	45,6	0,00	333	6,84	12,96	0,00	praca
50	139,5	38,8	46,5	0,00	324	6,83	12,85	0,00	
51	140,0	38,9	47,3	0,00	328	6,60	13,05	0,00	
52	142,9	38,8	48,1	0,00	322	6,72	13,17	0,00	
53	145,6	38,4	49,4	0,00	241	5,68	14,74	0,00	
54	147,8	38,1	49,9	0,00	332	6,92	12,77	0,00	
55	148,9	37,6	50,2	0,00	366	7,51	12,16	0,00	

W tabelach 6-8 przez,, - ,, oznaczono wartość poza dolnym zakresem pomiarowym urzędzenia.

### 5.2.2 Temperatura powierzchni kotła

Wartości temperatury powierzchni kotła w poszczególnych strefach przedstawione zostały w tabeli 9. Numery zamieszczone w pierwszej kolumnie zgodne są z rys. 9.

Tabela 9 Temperatura powierzchni kotła

<b>Nr miejsca pomiaru</b>	<b>Temperatura, °C</b>
0 % biomasy w mieszance	
1	57,1
2	47,5
3	49,3
4	59,2
5	40,2
6	58,3
7	57,1
9	48,0
20% biomasy w mieszance	
1	56,1
2	45,3
3	48,3
4	57,6
5	37,1
6	57,6
7	55,0
9	45,8
50% biomasy w mieszance	
1	57,6
2	44,0
3	43,3
4	60,6
5	37,3
6	55,1
7	54,2
9	44,1
80% biomasy w mieszance	
1	61,1
2	38,0
3	31,6
4	60,8
5	35,2
6	37,3
7	57,2
9	33,6

100% biomasy w mieszance	
1	56,8
2	45,9
3	48,5
4	56,3
5	35,5
6	53,1
7	56,5
9	48,4

### 5.3 Analiza wyników

W celu wyznaczenia jednostkowych ilości substancji w paliwie posłużono się następującymi zależnościami.

$$n'_C = \frac{c}{12} \quad (5.3.1)$$

$$n'_S = \frac{s}{32} \quad (5.3.2)$$

$$n'_{H_2} = \frac{h}{2} \quad (5.3.3)$$

$$n'_{O_2} = \frac{o}{32} \quad (5.3.4)$$

$$n'_{N_2} = \frac{n}{28} \quad (5.3.5)$$

$$n'_{H_2O} = \frac{w}{18} \quad (5.3.6)$$

gdzie: c, s, h, o, n, w - udział gramowy składnika w paliwie,  $\frac{kg \text{ składnika}}{kg \text{ paliwa}}$

$n'_C, n'_S, n'_{H_2}, n'_{O_2}, n'_{N_2}, n'_{H_2O}$  – jednostkowa ilość substancji w paliwie,  $\frac{kmol}{kg \text{ paliwa}}$

Obliczenia wykonane osobno dla węgla i osobno dla biomasy, zostały przedstawione w tabeli 10. Aby wyznaczyć jednostkową ilość substancji w paliwie konieczne było uwzględnienie procentowej zawartości węgla i biomasy w mieszance.

Tabela 10 Jednostkowa ilość substancji w węglu i biomacie

	Węgiel	Biomasa
	kmol/kg paliwa	
$n'_c$	0,0595833	0,0395833
$n'_h$	0,0210000	0,0300000
$n'_o$	0,0015000	0,0129031
$n'_n$	0,0005357	0,0000429
$n'_s$	0,0003125	0,0000063
$n'_{H_2O}$	0,0027778	0,0025000

Dalsze obliczenia oparto na równaniach stechiometrii spalania

- Bilans węgla:

$$n'_C = n''_{ss} ([CO_2] + [CO]) + \frac{1}{12P} (G_z \cdot c_z) \quad (5.3.7)$$

- Bilans siarki:

$$n'_S = n''_{ss} [\text{SO}_2] \quad (5.3.8)$$

- Bilans azotu:

$$n'_{\text{N}_2} + z_{\text{N}_2} n'_a = n''_{ss} [\text{N}_2] \quad (5.3.9)$$

- Bilans wodoru:

$$n'_{\text{H}_2} + n'_{\text{H}_2\text{O}} + X_{za} n'_a = n''_{\text{H}_2\text{O}} \quad (5.3.10)$$

- Bilans tlenu:

$$n'_{\text{O}_2} + \frac{1}{2} n'_{\text{H}_2\text{O}} + z_{\text{O}_2} n'_a + \frac{1}{2} X_{za} n'_a = \frac{1}{2} n''_{\text{H}_2\text{O}} + n''_{ss} ([\text{CO}_2] + [\text{SO}_2] + \frac{1}{2} [\text{CO}] + [\text{O}_2]) \quad (5.3.11)$$

- Bilans popiołu:

$$ap = \frac{1}{\bar{p}} [G_z (1 - c_z)] \quad (5.3.12)$$

gdzie:  $n''_{ss}$  – jednostkowa ilość spalin suchych,  $\frac{\text{kmol}}{\text{jednostkę paliwa}}$   
 $[\text{CO}_2], [\text{CO}], [\text{O}_2], [\text{N}_2], \dots, [k]$  – udział molowy składnika w spalinach suchych,  
 $\frac{\text{kmol } k}{\text{kmol spalin suchych}}$

$G_z$  – ilość żużłu, kg

$c_z$  – udział gramowy pierwiastka węgla w żużlu

$z_{\text{N}_2}$  – udział molowy azotu w powietrzu,  $\frac{\text{kmol N}_2}{\text{kmol suchego powietrza}}$

$z_{\text{O}_2}$  – udział molowy tlenu w powietrzu,  $\frac{\text{kmol O}_2}{\text{kmol suchego powietrza}}$

$n'_a$  – jednostkowe zużycie powietrza,  $\frac{\text{kmol}}{\text{jednostkę paliwa}}$

$X_{za}$  – molowy stopień zawilżenia powietrza,  $\frac{\text{kmol H}_2\text{O}}{\text{kmol powietrza suchego}}$

$a$  – współczynnik kontrakcji popiołu

W celu wyznaczenia sprawności kotła oraz strumienia paliwa podawanego do kotła konieczne było sformułowanie równania bilansu energii:

$$\dot{I}_{\text{utleniaacza}} + \dot{I}_{\text{paliwa}} = \dot{I}_{\text{spalin}} + \dot{Q}_{\text{użyteczne}} + \dot{Q}_{\text{otoczenia}} \quad (5.3.13)$$

gdzie:  $\dot{I}$  – strumień entalpii poszczególnych składników bilansu energii kotła

Zawarta w bilansie energia chemiczna paliwa wyznaczana jest na podstawie wartości opałowej. Stan odniesienia wartości opałowej to:  $t = 25^\circ\text{C}$  i  $p = 101,325 \text{ kPa}$ . W związku z tym pozostałe składniki bilansu również zostały odniesione do takiego samego poziomu. Do obliczeń przyjęto udział gramowy pierwiastka węgla w żużlu  $c_z = 0,3395$  oraz współczynnik kontrakcji popiołu  $a = 0,95$ . Ponadto założono brak unosu ( $u = 0$ ). Poszczególne składowe równania bilansu energii określone są następującymi zależnościami:

- Strumień energii utleniaacza:

$$\dot{I}_{\text{utleniaacza}} = \dot{P} n'_a (z_{\text{O}_2} \cdot M_{\text{O}_2} + z_{\text{N}_2} \cdot M_{\text{N}_2} + X_{za} \cdot M_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (5.3.14)$$

gdzie:  $M$  – masa molowa składnika,  $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$

$i$  – entalpia właściwa składnika,  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$

- Strumień energii paliwa:

$$\dot{I}_{\text{paliwa}} = \dot{I}_{\text{ch}_{\text{pal}}} + \dot{I}_{\text{f}_{\text{pal}}} \quad (5.3.15)$$

- Strumień energii chemicznej paliwa:

$$\dot{I}_{\text{ch}_{\text{pal}}} = \dot{P} \cdot W_d \quad (5.3.16)$$

- Strumień energii fizycznej paliwa:

$$\dot{I}_{f_{pal}} = \dot{P} \cdot c_{p_{pal}} \cdot t_{pal} \quad (5.3.17)$$

- Strumień energii spalin:

$$\dot{I}_{spalin} = \dot{I}_{ch_{sp}} + \dot{I}_{f_{sp}} \quad (5.3.18)$$

- Strumień energii chemicznej spalin:

$$\dot{I}_{ch_{sp}} = \dot{P} n_{ss}'' \{ (MW_d)_{CO} \cdot [CO] \} + \dot{I}_{ch_{st}} \quad (5.3.19)$$

- Strumień energii chemicznej stałych produktów spalania:

$$\dot{I}_{ch_{st}} = W_c \cdot a(G_z \cdot c_z) \quad (5.3.20)$$

gdzie:

$W_c$  - wartość opałowa bezpostaciowego pierwiastka węgla,  $\frac{kJ}{kg}$

- Strumień energii fizycznej spalin:

$$\dot{I}_{f_{sp}} = \dot{P} n_{ss}'' \sum_k [k] M_i k + \dot{I}_{f_{st}} \quad (5.3.21)$$

gdzie  $k$  – udział produktu spalania.

- Strumień energii fizycznej stałych produktów spalania:

$$\dot{I}_{f_{st}} = \dot{P} \cdot a \cdot p \cdot c_{p_{sp}} \cdot t_{sp} \quad (5.3.22)$$

gdzie:  $t_{sp}$  - temperatura spalin, °C

- Strumień strat ciepła do otoczenia:

Strumień strata ciepła do otoczenia dla poszczególnych przypadków wyznaczono w oparciu o wyniki pomiarów temperatury powierzchni kotła zamieszczone w tabeli 9. Strumień ciepła traconego do otoczenia obliczone zostało wyznaczone na podstawie następujących zależności.

$$\dot{Q}_{ot} = \dot{Q}_{konw} + \dot{Q}_r \quad (5.3.23)$$

$$\dot{Q}_{konw} = A \cdot \alpha_k \cdot (t_{śc} - t_{ot}) \quad (5.3.24)$$

$$\dot{Q}_r = A \cdot \alpha_r \cdot (t_{śc} - t_{ot}) \quad (5.3.25)$$

$$\alpha_r = 10^{-4} \cdot \varepsilon_{1-2} \cdot \sigma \cdot (T_{śc} - T_{ot}) \cdot \left[ \left( \frac{T_{śc}}{100} \right)^2 - \left( \frac{T_{ot}}{100} \right)^2 \right] \quad (5.3.26)$$

gdzie:  $A$  – pole powierzchni,  $m^2$

$\alpha_k$  – współczynnik wnikania ciepła dla konwekcji swobodnej,  $\frac{W}{m^2K}$

$t_{śc}$  – temperatura ścianki kotła, °C

$T_{śc}$  – temperatura ścianki kotła, K

$t_{ot}$  – temperatura otoczenia, °C

$T_{ot}$  – temperatura otoczenia, K

$\alpha_r$  – współczynnik wnikania ciepła dla radiacji,  $\frac{W}{m^2K}$

$\varepsilon_{1-2}$  – Emisyjność powierzchni kotła

$\sigma$  – Stała Stefana-Boltzmann,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4}$

Współczynnik wnikania ciepła dla konwekcji wyznaczony został w oparciu o wzory empiryczne, dla ściany płaskiej, pionowej. Emisyjność powierzchni kotła do obliczeń została przyjęta jako  $\varepsilon_{1-2} = 0,9$ . Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 11.

Tabela 11 Wyniki obliczeń – strumień strat ciepła do otoczenia

<b>Strumień strata ciepła do otoczenia</b>					
	0% biomasy	20% biomasy	50% biomasy	80% biomasy	100% biomasy
$\dot{Q}_{ot}, W$	645,6	593,8	564,6	405,8	588,9

- Strumień ciepła użytecznego

Strumień ciepła użytecznego wyznaczono w oparciu o zależność:

$$\dot{Q}_{uz} = \dot{G}_w \cdot (i_{w2} - i_{w1}) \quad (5.3.27)$$

gdzie:  $\dot{G}_w$  – strumień wody,  $\frac{kg}{s}$

$i_{w2}$  – entalpia właściwa wody na wylocie z kotła,  $\frac{kJ}{kg}$

$i_{w1}$  – entalpia właściwa wody na powrocie do kotła,  $\frac{kJ}{kg}$

Strumień wody ( $\dot{G}_w$ ) wyznaczono w oparciu o charakterystykę pompy udostępnioną przez producenta. W tym celu skorzystano z odczytanego w trakcie pomiarów spadku ciśnienia ( $\Delta p = 50kPa$ ) oraz wyznaczonej gęstości wody w temperaturze  $t_{w1}$ . Wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 12.

Tabela 12 Wyniki obliczeń - ciepło użyteczne

<b>Strumień ciepła użytecznego</b>					
	0% biomasy	20% biomasy	50% biomasy	80% biomasy	100% biomasy
$\dot{G}_w, kg/s$	0,1378	0,1379	0,138	0,1379	0,1379
$\dot{Q}_{uz}, kW$	7,032	6,862	8,487	7,669	7,269

Na podstawie sporządzonego bilansu energii kotła wyznaczono strumień podawanego paliwa. Wyniki przeprowadzonych obliczeń zamieszczono w tabeli 13.

Tabela 13 Wyniki obliczeń - strumień paliwa

<b>Strumień paliwa</b>					
	0% biomasy	20% biomasy	50% biomasy	80% biomasy	100% biomasy
$\dot{P}, kg/s$	0,031	0,030	0,031	0,029	0,036

#### 5.4.1 Określanie sprawności energetycznej

Sprawność energetyczna kotła definiowana jest jako:

$$\eta_{EK} = 1 - (S_{wf} + S_{wch} + S_z + S_u + S_{ot}) \quad (5.4.1.1)$$

gdzie:  $\eta_{EK}$  – sprawność energetyczna kotła

$S_{wf}$  – względna strata wylotowa fizyczna



$S_{wch}$  – względna strata wylotowa chemiczna

$S_z$  – względna strata w żużlu

$S_u$  – względna strata w popiele lotnym

$S_{ot}$  – względna strata ciepła do otoczenia

Względne straty energii odniesione zostały do całkowitego strumienia energii doprowadzonej do kotła.

$$S_n = \frac{\dot{E}_n}{\dot{P} \cdot W_d} \quad (5.4.1.2)$$

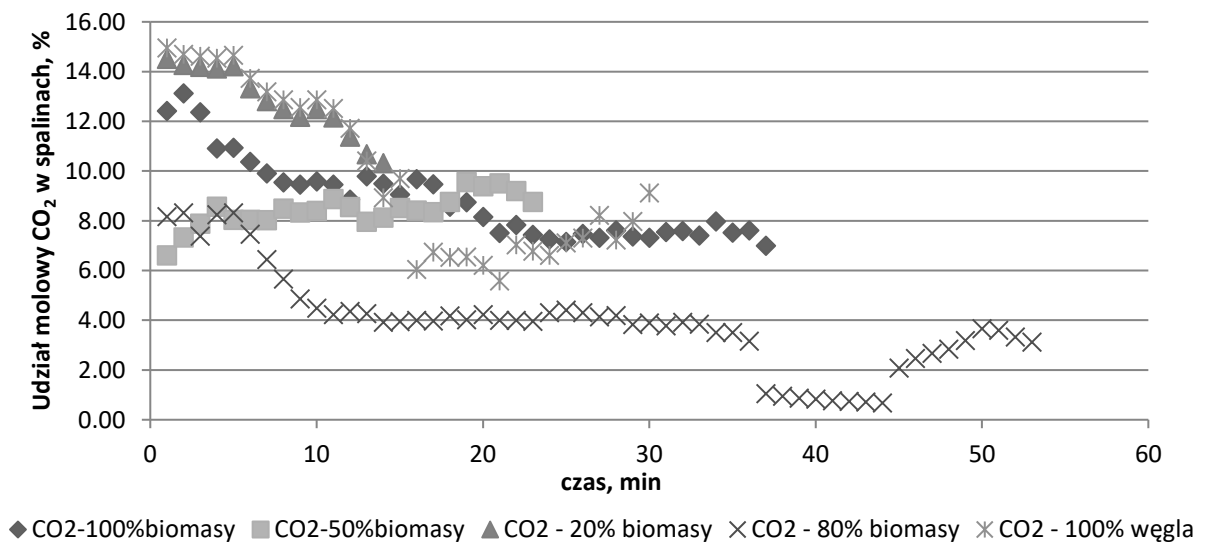
Wartości sprawności kotła dla poszczególnych mieszanek paliwa zestawione zostały w tabeli 14.

Tabela 14 Wyniki obliczeń - sprawność kotła

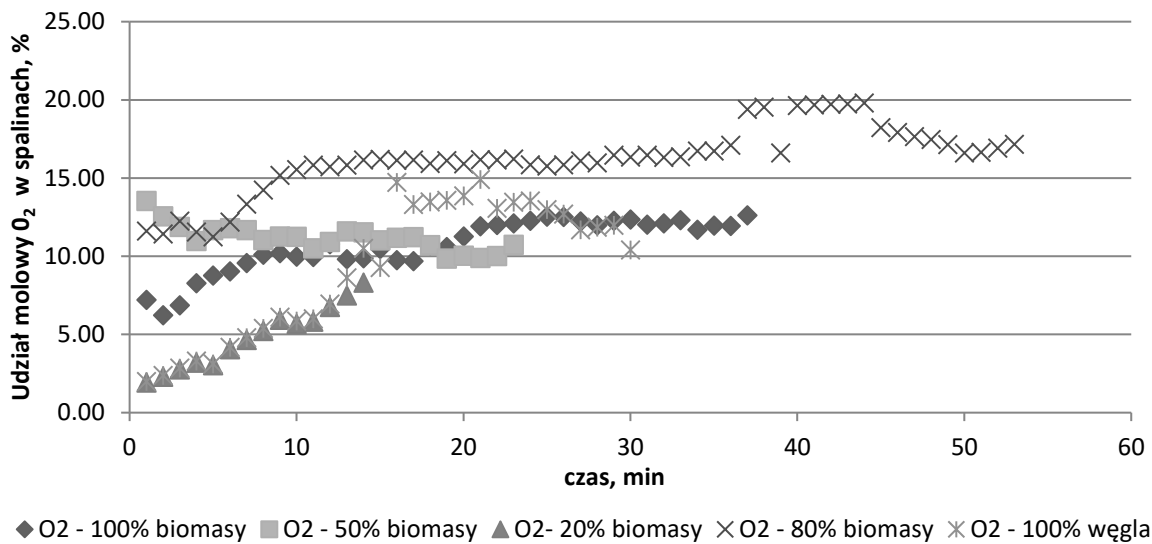
Sprawność kotła					
	0% biomasy	20% biomasy	50% biomasy	80% biomasy	100% biomasy
$\eta_{kotła}$	78,77%	80,34%	82,01%	84,22%	87,22%

#### 5.4.2 Analiza składu spalin i emisji substancji szkodliwych

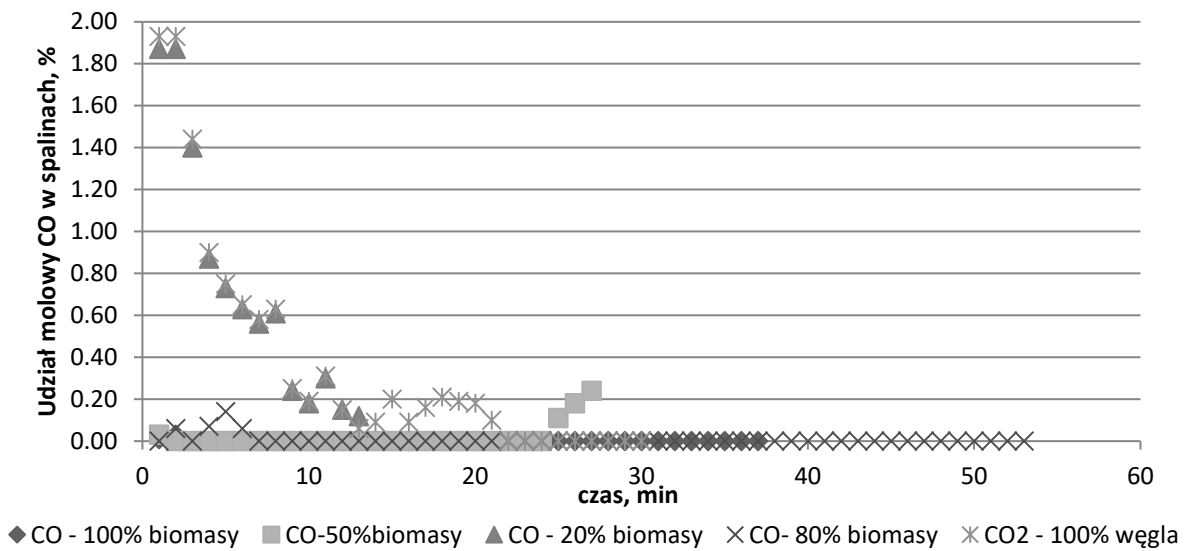
Wykresy przedstawione na rys. 10 - 13 obrazują jak zmienia się zawartość dwutlenku węgla (rys. 10), tlenu węgla (rys. 12), dwutlenku siarki (rys. 13) oraz tlenu (rys. 11) w spalinach. Na wykresach przedstawiono wszystkie mieszanki paliwowe użyte podczas prowadzonych badań. Zamieszczone wykresy są graficznym obrazem wyników zestawionych w tabelach 4-8. Ponieważ w trakcie pomiarów nie kontrolowano współczynnika nadmiaru powietrza ( $\lambda$ ) wykresy te, nie mogą służyć do porównania procesu spalania badanych mieszanek paliwowych.



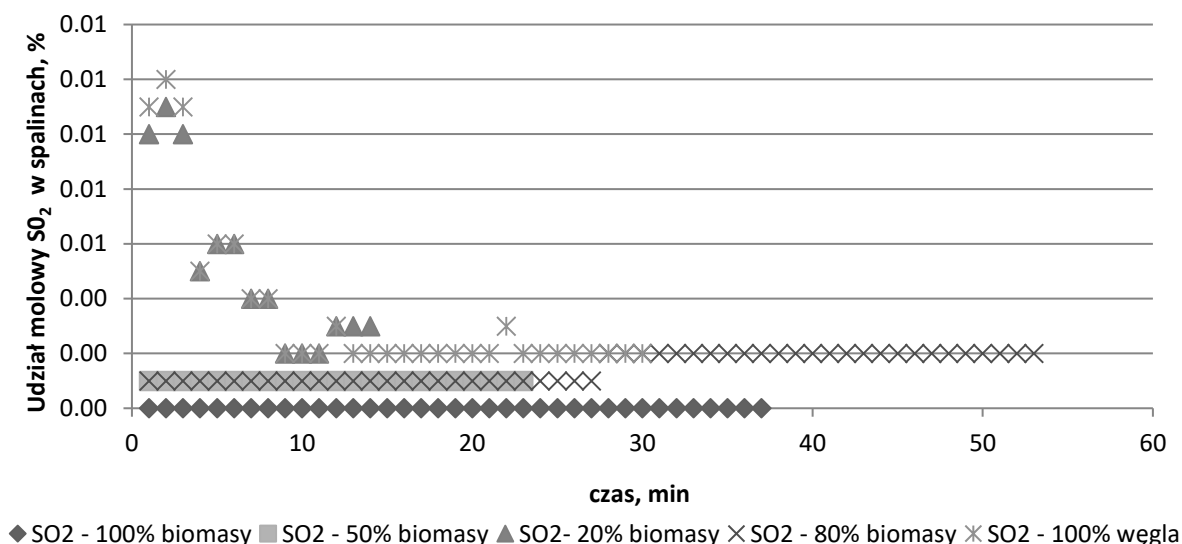
Rysunek 10 Udział molowy dwutlenku węgla w spalinach



Rysunek 11 Udział molowy tlenu w spalinach



Rysunek 12 Udział molowy tlenku węgla w spalinach



Rysunek 13 Udział molowy dwutlenku siarki w spalinach

Wyniki obliczeń składu spalin, uśrednione dla jednego cyklu pracy kotła, dla wszystkich przebadanych mieszanek paliwowych przedstawiono w tabeli 15.

Tabela 15 Wyniki obliczeń - skład spalin

	Skład spalin				
	0% biomasy	20% biomasy	50% biomasy	80% biomasy	100% biomasy
CO <sub>2</sub>	7,19%	7,09%	7,11%	7,50%	6,05%
CO	0,03%	0,02%	0,00%	0,04%	0,01%
SO <sub>2</sub>	0,04%	0,03%	0,02%	0,012%	0,00096%
N <sub>2</sub>	81,18%	81,22%	81,35%	81,64%	81,23%
O <sub>2</sub>	11,56%	11,63%	11,51%	10,81%	12,71%

W tabeli 15 wartość udziału tlenku węgla dla mieszanki 50% biomasy została wyznaczona dla drugiego cyklu pracy kotła. Zgodnie z tabelą 6 wartość ta przez cały czas trwania pomiarów wynosiła 0 lub była poniżej dolnego zakresu pomiarowego urządzenia.

Korzystając z otrzymanego składu spalin dla jednego cyklu pracy kotła oraz strumienia ciepła użytecznego (tabela 12) wyznaczono jednostkową ilość substancji emitowanych do środowiska. Do obliczeń, jako czas przyjęto czas trwania jednego cyklu pracy kotła. Ilość wyemitowanych substancji wyznaczono na podstawie zależności.

$$G_x = 1000 \cdot \dot{P} \cdot n_{ss} \cdot [X] \cdot M_x \cdot \tau \quad (5.4.1.3)$$

gdzie:  $\tau$  – czas trwania jednego cyklu pracy kotła, s

W powyższym wzorze przez X oznaczono poszczególne składniki spalin. Otrzymane wyniki emisji substancji do otoczenia zamieszczono w tabeli 16.

Tabela 16 Wyniki obliczeń - substancje emitowane do środowiska

Ilość substancji emitowanych do otoczenia, g/kWh					
	0% biomasy	20% biomasy	50% biomasy	80% biomasy	100% biomasy
CO <sub>2</sub>	38,037	38,437	31,165	36,381	30,963
CO	0,159	0,108	0,000	0,194	0,051
SO <sub>2</sub>	0,212	0,168	0,106	0,058	0,005

#### 5.4.3 Stężenie emitowanej substancji przy zawartości tlenu w spalinach [O<sub>2</sub>]<sub>ref</sub> = 10%

Stężenie emitowanych substancji tj. dwutlenku węgla, tlenku węgla oraz dwutlenku siarki przy zawartości tlenu w spalinach [O<sub>2</sub>]<sub>ref</sub> = 10% określono korzystając z zależności [16][17]:

$$E_{10\%} = C_{sub} \frac{0,21 - x_1}{0,21 - x_2} \quad (5.4.3.1)$$

gdzie:

$E_{10\%}$  - stężenie emitowanej substancji przy zawartości tlenu w spalinach równej 10%,  $\frac{mg}{m_n^3}$

$C_{sub}$  - stężenie substancji w spalinach, przy zmierzonej zawartości tlenu w spalinach,  $\frac{mg}{m_n^3}$

$x_1$  - udział molowy tlenu w spalinach

$x_2$  - referencyjny udział molowy tlenu w spalinach;  $x_2 = 0,1$

Stężenie substancji w spalinach ( $C_{sub}$ ) wyznaczono w oparciu o zależność

$$C_{sub} = \frac{E_{sub} \cdot 10^6}{V_c} \quad (5.4.3.2)$$

gdzie:  $E_{sub}$  - strumień masowy danej substancji w spalinach,  $\frac{kg}{h}$

$V_c$  - objętościowy strumień spalin wilgotnych w warunkach normalnych,  $\frac{m_n^3}{h}$

$$V_c = B \cdot V_j = B \cdot (V_{sp} + (\lambda - 1) \cdot V_{pow}) \quad (5.4.3.3)$$

$$V_{sp} = \frac{0,212 \cdot W_d}{1000} + 1,65 \quad (5.4.3.4)$$

$$V_{pow} = \frac{0,241 \cdot W_d}{1000} + 0,5 \quad (5.4.3.5)$$

gdzie: B - godzinowe zużycie paliwa,  $\frac{Mg}{h}$

$V_j$  - jednostkowa objętość spalin wilgotnych powstałych ze spalania 1kg paliwa w warunkach stechiometrycznych,  $\frac{m_n^3}{kg}$

$V_{sp}$  - objętość spalin powstałych ze spalania 1 kg paliwa w warunkach stechiometrycznych,  $\frac{m_n^3}{kg}$

$V_{pow}$  - teoretyczna objętość powietrza potrzebna do spalenia 1 kg paliwa,  $\frac{m^3}{kg}$

$\lambda$  – współczynnik nadmiaru powietrza, -

Tabela 17 Stężenie substancji w spalinach,  $\frac{mg}{m^3}$

	0% biomasy	20% biomasy	50% biomasy	80% biomasy	100% biomasy
CO <sub>2</sub>	131939,00	123804,00	116732,00	120236,0	74358,00
CO	350,4	222,30	0,00	408,1	78,22
SO <sub>2</sub>	1102,0	879,50	575,90	280,0	17,22

## 6 Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzona analiza pokazuje, że dodanie biomasy do paliwa ma generalnie korzystny wpływ na proces spalania w kotle z paleniskiem retortowym. Dodanie biomasy powoduje zmniejszenie emisji substancji szkodliwych do otoczenia oraz zwiększenie zawartości tlenu w spalinach. Emisja tlenku węgla oraz dwutlenku siarki w przypadku biomasy jest praktycznie równa 0. Wynika to z faktu, że zapłon i spalanie odpowiednio przygotowanej biomasy następuje zdecydowanie łatwiej niż węgla i można wówczas się spodziewać spalania zupełnego. Ponadto biomasa zawiera mniej siarki niż węgiel i stąd też wynika mniejsza zawartość dwutlenku siarki w spalinach.

Analiza wykazała także, że wraz ze zmianą ilości biomasy w mieszance paliwowej zmienia się również strumień paliwa podawanego do kotła w cyklu pracy. Największy strumień paliwa podawany jest dla mieszanki składającej się w 100% z biomasy, co jest oczywiście rezultatem oczekiwanym – mniejsza kaloryczność biomasy powoduje konieczność spalania większej jej ilości dla zapewnienia odpowiedniej wydajności kotła. Jest to istotne dla użytkownika kotła ze względów ekonomicznych. Zgodnie z danymi Urzędu Regulacji Energetyki, biomasa jest obecnie najdroższym paliwem dostępnym na rynku. Choć cena za tonę węgla i peletu jest podobna, to należy zauważyć, że zgodnie z powyższą analizą do osiągnięcia tego samego efektu energetycznego potrzebna jest większa ilość biomasy. Na korzyść biomasy przemawia jednak fakt mniejszej emisji substancji szkodliwych do otoczenia oraz, w porównaniu z węglem kamiennym, zdecydowanie mniejsza ilość popiołu pozostałego po spalaniu paliwa. Podczas prowadzonych badań zaobserwowano jednak również problemy z podawaniem biomasy z zasobnika do paleniska. Ponadto czas nagrzewania wody do założonych 50°C w przypadku spalania 100% biomasy był zdecydowanie dłuższy niż w przypadku pozostałych mieszanek paliwowych.

Dodanie biomasy do węgla spalanego w kotle nie zmienia znacząco strat ciepła do otoczenia. Wartości temperatury powierzchni kotła w poszczególnych przypadkach są do siebie zbliżone, a co za tym idzie, również strumienie ciepła traconego do otoczenia są bardzo podobne. W tabeli 11 można zaobserwować, że dla wszystkich analizowanych mieszanek paliwowych strata ciepła do otoczenia to około 600 W.

Sprawność energetyczna kotła dla analizowanych mieszanek utrzymywała się na poziomie około 80%, co nie jest wynikiem złym. W tabeli 14 widac kilkuprocentowe różnice, w zależności od użytej mieszanki. Na wyniki otrzymane podczas pomiarów miały również wpływ parametry otoczenia. Badania prowadzone były w okresie kwiecień – maj, a więc już po zakończeniu sezonu grzewczego. Każdego dnia parametry otoczenia oraz warunki odbioru ciepła były inne i fakt ten został oczywiście uwzględniony w obliczeniach. Zmiany parametrów

otoczenia mogą jednak w pewnym stopniu tłumaczyć różnice w otrzymanych wartościach sprawności kotła.

Uwagę zwracają wyniki pomiarów dla mieszanki paliwowej zawierającej 80% biomasy, które zaburzają oczekiwaną tendencję. Wyniki pomiarów dla wspomnianej mieszanki prawdopodobnie obciążone są błędem grubym. Spowodowany on może być problemami podczas prowadzonych badań z pomiarem temperatury wody wylotowej z kotła oraz z podawaniem mieszanki paliwa. W trakcie pomiarów zaobserwowano wyraźną różnicę (około 5°C) pomiędzy temperaturą wskazywaną przez zewnętrzną termoparę oraz temperaturą wskazywaną na panelu kotła. W związku z tym konieczna była zmiana parametrów kotła – obniżenie temperatury wody na wypływie z kotła do 45°C.

Do pełnej oceny wpływu na środowisko należałoby jeszcze ocenić emisję pyłów ze spalinami. Z uwagi na większą zawartość części lotnych należy się spodziewać większej emisji przy współspalaniu biomasy.

Podsumowując można jednak stwierdzić, że współspalanie biomasy z węglem w kotle z paleniskiem retortowym ma pozytywne skutki środowiskowe (w postaci zmniejszonej emisji substancji szkodliwych do otoczenia) przy stosunkowo niewielkim spadku sprawności energetycznej. W analizowanym przypadku zwiększająca się zawartość biomasy w paliwie powodowała jednak pewne problemy związane z podawaniem paliwa do paleniska. Podajnik ślimakowy miażdżył pelety, które agregowały w większe ziarna i powodowały chwilowe przerywanie ciągłości podawania paliwa.

## 7 Bibliografia

- [1] *Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy w sprawie szczegółowego zakresu obowiązku zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonych w odnawialnych źródłach energii*, Warszawa (2004),
- [2] L. Janowicz; *Biomasa w Polsce*; Energetyka i Ekologia; sierpień (2006)
- [3] J. Wójcik; *Diagnostyka wybranych palenisk retortowych*; Technicka Diagnostika; 2011
- [4] *Energia ze źródeł odnawialnych w 2015 roku*; GUS; grudzień (2016)
- [5] W. Rybak; *Spalanie i współspalania biopaliw stałych*; Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej; Wrocław (2006)
- [6] M. Nantka; *Ogrzewnictwo i Ciepłownictwo*; Wydawnictwo Politechniki Śląskiej; Gliwice (2013)
- [7] J. Szargut, *Termodynamika*, Wyd. 7, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa (2016).
- [8] P. Nakonieczny, P. A. Kluza, G. Tatar, R. Bródka; *Rodzaje, charakterystyka oraz wybrane problemy eksploatacji kotłów i pieców zasilanych różnymi paliwami*; Acta Sci. Pol., Technica Agraria; Lublin (2014)
- [9] A. Miller; *Maszynoznawstwo*; Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne; Warszawa (2009)
- [10] Z. Gnutem, W. Kordylewski; *Maszynoznawstwo energetyczne. Wprowadzenie do energetyki cieplnej*; Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej; Wrocław (2003)
- [11] Instalacje budowlane: <http://www.instalacjebudowlane.pl/5499-23-40-kotly-na-paliwo-stale--przeglad.html>; data dostępu: 09.12.2017
- [12] Budownictwo Architektura: <http://www.baskonsolosluk.ch/budownictwo/kotly-stalowe>; data dostępu: 11.12.2017

- [13] Gram w zielone – portal zielonej energii: <http://gramwzielone.pl/dom-energooszczedny/2269/ile-kosztuje-ogrzewanie-peletem>; data dostępu: 29.05.2018
- [14] Czyste Ogrzewanie: <http://czysteogrzewanie.pl/kociol/rodzaje-kotlow-weglowych/>; data dostępu: 11.12.2017
- [15] Przegląd elementów ogrzewań wodnych: <http://delibra.bg.polsl.pl/Content/26039/3%20-%20Kotly.pdf>; data dostępu: 18.06.2018
- [16] <http://materialy.wb.pb.edu.pl/tomaszkielbasa/files/2014/10/Obliczenia-projekt-is-2014.pdf>; data dostępu: 18.06.2018
- [17] [http://airpomerania.pl/files/132/36/38/emisja\\_trendy\\_wskazniki.pdf](http://airpomerania.pl/files/132/36/38/emisja_trendy_wskazniki.pdf); data dostępu: 18.06.2018

## **Experimental energy and ecological analysis of biomass co-firing with coal in the central heating boiler with a retort furnace**

Izabela Dyrłaga

**Key words:** biomass, hard coal, co-firing, retort furnace

**Abstract:** Nowadays, renewable sources of energy are more and more popular. In central heating boilers, hard coal is being replaced by the biomass. The article presents an ecological and energy analysis of biomass co-firing with coal in the central heating boiler with a retort furnace. Biomass made out of wood was analysed. The analyzed boiler is designed to hard coal combustion. The article covers two main aspects: (1) the ecological aspects, which contains emission of harmful substances into the environment and (2) the energy aspect, especially energy efficiency of the boiler. The ecological analysis contains mainly emission of carbon dioxide, carbon monoxide, nitrogen monoxide and sulfur dioxide. For the full range of results, fuel mixtures with different biomass content were analyzed.